

UDC 629.114.3.075

# フル・トレーラーの動特性

Dynamic property of Full-Trailer

中 川 齊\*

Tadashi NAKAGAWA

## 1. ま え が き

本年5月には東名高速道路も全通し日本においても高速道路輸送が本格的な段階を迎え、大型および超大型の連結車両の存在が注目されている。連結車両で現在主に使用されているのはセミ・トレーラーと図1のごときフル・トレーラーであるが、海外事情をみるとアメリカでは道路幅が広く輸送単位も大きいことからセミ・トレーラーが主に使用され、ヨーロッパでは道路幅も狭く輸送単位も小さいことが多いことからフル・トレーラーが主に使用されている。

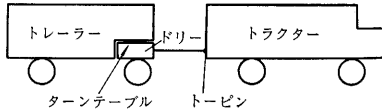


図1

日本においても現在は主にセミ・トレーラーが使用されているが、ヨーロッパと同様な理由から追々主力はフル・トレーラーに移行するものと思われる。

ここではこのフル・トレーラーの高速走行上での問題であるトレーラー部分がトラクターに対して連結点回りに振れる横振動問題等安定性の問題およびフル・トレーラーとしての特性とトレーラーを取去ったトラックとしての特性の比較等をし、また激しく制動をかけた時に連結点回りにトラクターとトレーラーが折れまがるジャック・ナイフ運動について非線型式を導き出し計算機上でシミュレートした。

## 2. 安定性検討のための線型運動方程式

記号を図2のごとくにして自由度を①トラクター横速度  $y$ , ②トラクター・ヨー角  $\Psi_i$ , ③ドリー・トラクター相対ヨー角  $\Psi_a$ , ④トレーラー・トラクター相対ヨー角  $\Psi$  に取って力およびモーメントの関係を線型化して方程式を作成すると次のごとくなる。

$$\begin{aligned}
 & m l_h' \ddot{y} + \{ (l_r' + l_h') c_1 - (l_r' - l_h') c_2 \} \dot{y} / V + A_i \ddot{\Psi}_i \\
 & + \{ m l_h' V + l_r' (l_r' + l_h') c_1 + l_r' (l_r' - l_h') c_2 \} \dot{\Psi}_i / V \\
 & - f_1 \dot{\Psi}_a = (l_r' + l_h') c_1 \beta_1 \\
 & m l_f \ddot{y} + c_4 \dot{y} / V - \{ A + m l_f (l_h' + l_c + l_e + l_f) \} \ddot{\Psi}_i \\
 & + \{ m l_f V - c_4 l (l_h' + l_c + l_e + l) / V \} \dot{\Psi}_i - m l_f (l_c \\
 & + l_e) \dot{\Psi}_a + \{ f_2 - c_4 l (l_c + l_e) / V \} \dot{\Psi}_a - (A + m l_f^2) \ddot{\Psi} \\
 & - \left( f_2 + \frac{c_4 l^2}{V} \right) \dot{\Psi} - c_4 l \Psi = 0
 \end{aligned}$$

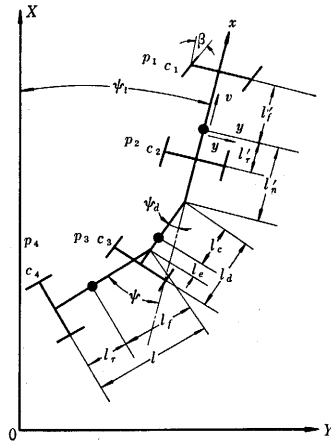


図2

$W_T(m_i)$ ,  $W_D(m_a)$ ,  $W(m)$ : トラクター, ドリー, トレーラーの重量(質量)  
 $A_r, A_d, A$ : 同じく慣性モーメント  
 $p_1, p_2, p_3, p_4$ : 各軸荷重  
 $c_1, c_2, c_3, c_4$ : 各軸コーナリング・パワ  
 前進速度  $V$  はトラクター中心線方向に一定

$$\begin{aligned}
 & (m_i + m_a + m) \ddot{y} + (c_1 + c_2 + c_3 + c_4) \dot{y} / V - \{ m_a (l_h' + l_c) \\
 & + m (l_h' + l_c + l_e + l_f) \} \dot{\Psi}_i + \left\{ (m_i + m_a + m) V \right. \\
 & + \frac{l_r' c_1 - l_r' c_2 - (l_d + l_h') c_3 - (l_h' + l_c + l_e + l) c_4}{V} \left. \right\} \dot{\Psi}_i \\
 & - \{ m a l_c + m (l_c + l_e) \} \ddot{\Psi}_a - \left\{ \frac{l_a c_3 + (l_c + l_e) c_4}{V} \right\} \dot{\Psi}_a \\
 & - c_3 \dot{\Psi}_a - m l_f \ddot{\Psi} - \frac{l c_4}{V} \dot{\Psi} - c_4 \Psi = c_1 \beta \\
 & - \{ m a l_c + m (l_c + l_e) \} \ddot{y} - \frac{l_a c_3 + (l_c + l_e) c_4}{V} \dot{y} + \{ A_d \\
 & + m a l_c (l_h' + l_c) + m' (l_c + l_e) (l_h' + l_c + l_e + l_f) \} \dot{\Psi}_i \\
 & - \left[ \{ m (l_c + l_e) + m a l_c \} V \right. \\
 & \left. - \frac{l_a (l_a + l_h') c_3 + (l_c + l_e) (l_h' + l_c + l_e + l) c_4}{V} \right] \dot{\Psi}_i \\
 & + \{ A_d + m a l_c^2 + m (l_c + l_e)^2 \} \dot{\Psi}_a + \left\{ f_1 + f_2 \right. \\
 & + \frac{l_d^2 c_3 + (l_c + l_e)^2 c_4}{V} \left. \right\} \dot{\Psi}_a + l_a c_3 \dot{\Psi}_a + m l_f (l_c + l_e) \dot{\Psi} \\
 & + \left\{ \frac{(l_c + l_e) l c_4}{V} - f_2 \right\} \dot{\Psi} + (l_c + l_e) c_4 \Psi = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

## 3. 定常状態

動的安定については特性式の解がその性質を示すので4章で述べることにしてここでは静的安定を考える。

図3のごとく半径  $R$  の定常円旋回を行なっているフル・トレーラーを考える ((1) で  $\dot{y} = \dot{\Psi}_i = \dot{\Psi}_a = \dot{\Psi} = \dot{\Psi}$

\* 東京大学生産技術研究所 第2部  
 指導教官 平尾 収教授

研究速報  
 = $\Psi=0$ ). この際のトラクター前輪実舵角  $\beta$  に対するトラクターヨー角速度  $\Psi_1$  の関係を荷重の関係を入れて整理すると

$$\frac{\Psi_1}{\beta} = \frac{V}{1 + \left( \frac{P_1}{c_1} - \frac{P_2}{c_2} \right) \frac{V^2}{(l_f' + l_r')g}} \quad (2)$$

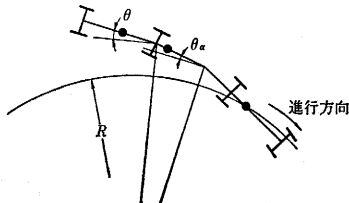


図3

みかけ上トラクター単体の場合と同一な形になる。(ただし  $P_1, P_2$  にはトレーラー部分の影響が加わる場合がある.) (2)

より速度の増加した時に  $P_1/c_1 - P_2/c_2 \geq 0$  に応じて回転半径が増加, 不変, 減少する。

次に  $\Psi_a, \Psi$  についての解で図3の  $\theta$  および  $\theta_a$  を示すと

$$\theta_a = \frac{P_3 V^2}{c_3 g R} \quad \theta = \frac{P_4 V^2}{c_4 g R}$$

$\theta_a$  および  $\theta$  が小さい程横振動を抑える動きが強いことになる。(すなわちダンピングがよく効いている。) そこで横振動を起こしにくく安定なフル・トレーラーを作る目標としては(静的に方向安定であれば動的にも方向安定であるから) (I)  $P_1/c_1 - P_2/c_2 \rightarrow$  大, (II)  $P_3/c_3 \rightarrow$  小, (III)  $P_4/c_4 \rightarrow$  小とすることがあげられる。以上より最も重要なパラメータとしては (I) (II) (III) すべてに影響するターンテーブル位置, ドリー車軸間距離  $l_e$  があげられる。また各パラメータの安定性に及ぼす影響は (I) (II) (III) に及ぼす影響のとおりである。

4. 特性式および特性根

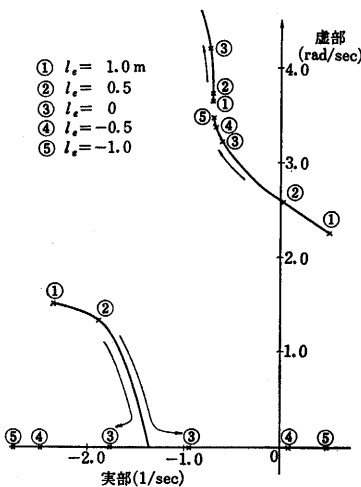


図4 開ループ系特性根軌跡

ハンドル固定で走行中のフル・トレーラーが横風等の外乱を受けた後の安定性は (1) の特性式  $\Delta=0$  の根 (特性根) の正負によって判別できる。

その他舵固定ではなく人間が操舵する場合を近藤の仮定により車より  $L_m$  前

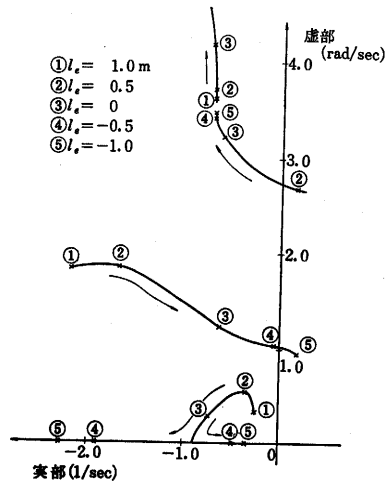


図5 閉ループ系特性根軌跡

には3章で示した, 定常状態の場合の影響とはほぼ合致する。

ここでは  $l_a=l_e$  として代表的なパラメータであるドリー車軸とターン・テーブル位置のオフセット量  $l_e$  を例にとり開ループの場合を図4に閉ループの場合を図5に示す。

実用されている一般のフル・トレーラーの各パラメータの数値を見ると  $l_e=0, l_o=l_a$  で  $A_d=0, f_1=f_2=0$  とみなせる。また  $A \equiv ml_f l_r$  と考えて特性方程式  $\Delta$  を Matrix の形のまま整理すると近似的に因数分解できて次式のごとくなる。

$$\begin{aligned} \Delta = & s^2 \left\{ (A_d m l_h' - A_i m l_a) s^2 \right. \\ & + \left\{ A_d \frac{(l_f' + l_h') c_1 - (l_r' - l_h') c_2}{V} - A_i l_a \frac{c_1 + c_2}{V} \right. \\ & \left. \left. - m l_a \frac{l_f'^2 c_1 + l_r'^2 c_2}{V} \right\} s + \frac{l_f' c_1 - l_r' c_2}{V} (m_i V \right. \\ & \left. + \frac{l_f' c_1 - l_r' c_2}{V} l_a - \frac{(c_1 + c_2)(l_f'^2 c_1 + l_r'^2 c_2) l_a}{V^2} \right\} \\ & \times \left\{ (A + m l_f'^2) s^2 + \frac{l^2 c_4}{V} s + c a l \right\} \\ & \times \left\{ \left( m \frac{l_r}{l} + m_a \right) l_a s^2 + \frac{c_3 l_a}{V} s + c_3 \right\} \end{aligned}$$

関係するパラメータより第1項はトラクター系, 第2項はドリー系, 第3項はトレーラー系の特性式と推定できる。実際にトラクター単体の場合の系の特性式と第1項を比較すると第1項での~~~~部のみが異なる。これはトレーラーを連結したことによりトラクター側に表われる影響と考えられる。以上よりトレーラーのトラクターに対する干渉をさらに小さくするには~~~~部の絶対値が小さくなるように  $l_a$  を大きく,  $A_d$  および  $l_h'$  を小

方の偏差を検出して実舵角にフィードバックするモデルでの安定性を運動方程式(1)を座標変換しかつ閉ループ系としてその特性式の根より判別する。以上の二とおりの場合についての各パラメータの影響を数的に解くと定性的

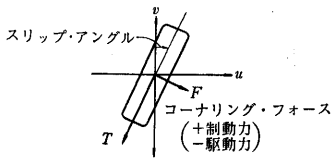


図 6

さくすればよいことがわかる。

5. ハンドリング特性

フル・トレーラーとトラクター単体で普通のトラックとして走行させた場合のハンドリング特性の比較を開ループの場合と閉ループの場合について計算機上で走行シミュレーションをする。まず開ループの場合はまったく同一な軌跡を画くような種々の運動……車線変更, 直線走行から定常円旋回に移る運動等……を軌跡を入力として(コース入力)行なわせてその際の実舵角等の比較をし, また両方ともに同じフィード・バックを設けた場合について(閉ループ系)車線変更, 折線乗移り等を行なわせた場合の挙動を比較すると開ループの場合および閉ループの場合とも, 二つの特性の間に大きな差はなかった。すなわち線形範囲内でゆるやかな運動の場合にはフル・トレーラーとトラクター単体の場合とではハンドリング特性に差は出てこないと考えてよい。

6. ジャック・ナイフ運動

フル・トレーラー等連続車両の制動時の問題であるジャックナイフ運動解析のためには5章までの線型理論ではシミュレート不可能である。そこでトラクター中心線方向速度を可変として新しく自由度にとって非線型5自由度運動方程式を作成する。

ただしタイヤ力は飽和領域まで考え下記のように仮定する。

- (1) 対地(転動)摩擦係数  $\mu$  は荷重  $P$  の大きさによらず一定。
- (2) 対地タイヤ力は  $D_{max} = \mu P$  以下

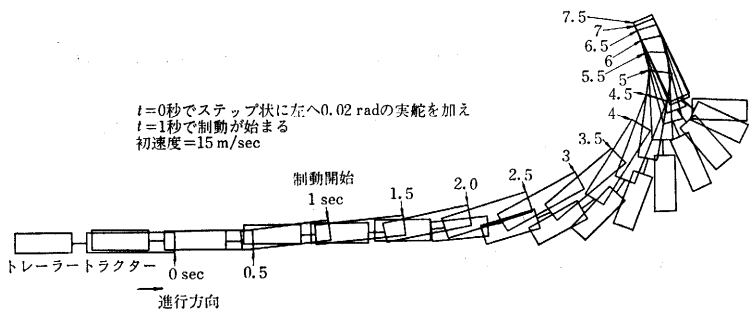
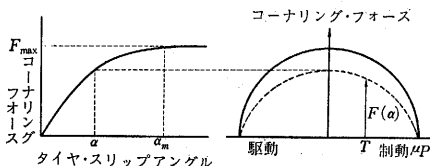


図 8 トラクタ後輪のみをロックするまで制動したとき

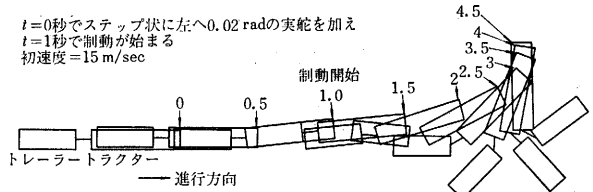


図 9 トラクター空荷でトレーラーが満載(トラクター前後輪超過制動)

(3) タイヤ横力の最大値  $L$  は図7のごとく

$$L = \sqrt{D_{max}^2 - T^2}$$

タイヤ横力の飽和するスリップ・アングルを  $\alpha_m$  とすると, スリップ・アングル  $\alpha$  でのタイヤ横力は

$$F = \frac{3}{2} \frac{\sqrt{D_{max}^2 - T^2}}{\alpha_m} \left( \alpha - \frac{\alpha^3}{3\alpha_m^3} \right)$$

この非線型式により超過制動で完全にスリップするタイヤがある時の運動をシミュレートして3つの場合を例にとり図8~図10に示す。(初速度 15 m/sec で直線走行中にステップ的に 0.02 rad の実舵角を切って1秒後に制動をかけた場合。)

ただし図9, 図10でブレーキ配分はトラクター, トレーラーとも満載状態の時に適正となるような配分で制動力は油圧ブレーキの場合油圧がマクシマム, 1/2 となるような制動。  
(1969年5月31日受理)

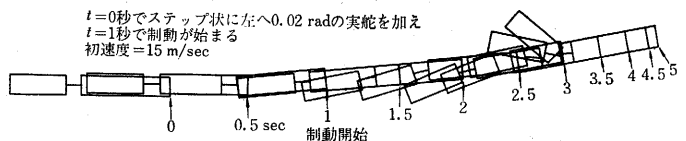


図10 トラクター満載でトレーラーが空荷(ドリー輪, トレーラ輪が超過制動)